

## بررسی اثر پارامترهای هندسی مختلف بر رفتار فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

سجاد آذرخش\*

دانشجوی دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران،  
kasra.azarakhsh@yahoo.com

علی قمریان

دانشجوی دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،  
ali\_ghamarian@yahoo.com

محمدجواد رضوانی

دانشیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران،  
m.rezvani@semnaniau.ac.ir

### چکیده

سازه‌های جدارنازک به‌عنوان اجزایی با قابلیت جذب انرژی فوق‌العاده و استحکام به وزن بالا همواره مورد توجه طراحان بوده‌اند. این سازه‌ها در اشکال و هندسه‌های مختلف ساخته می‌شوند. لوله‌های مخروطی یکی از انواع سازه‌های جدارنازک بوده که تحت بارگذاری به شیوه‌های مختلف، تغییرشکل پلاستیک داده و انرژی جذب می‌کنند. انرژی جذب شده از طریق تغییرشکل پلاستیک به عوامل مختلفی از جمله هندسه لوله، حجم، زاویه اعمال نیرو و جنس مواد وابسته است. در این مقاله مطالعه‌ای جامع بر روی لوله‌های مخروط جدارنازک به عنوان جاذب انرژی با استفاده از شبیه‌سازی عددی انجام شده است. برای این منظور، اثر پارامترهای مختلف شامل وجود درپوش در انتهای لوله، شیارهای حلقوی و طولی، ایجاد حفره در دیواره لوله و زاویه بارگذاری بر نحوه لهیدگی و میزان جذب انرژی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد اگر چه وجود شیارهای حلقوی، طولی و ایجاد حفره بر روی بدنه لوله منجر به کاهش جذب انرژی می‌شود، اما باعث فروریزی پایدار و کاهش نیروی بیشینه لهیدگی شده و از شدت نیروهای وارده به سرشتینان و سازه اصلی جلوگیری می‌کند. همچنین، نتایج نشان داد که تعداد حفره‌ها اثر محسوسی بر شیوه فروریزش و رفتار نمودار نیرو-جابجایی ندارند؛ در حالی که شکل هندسه حفره بر نحوه فروریزش و نیروی متوسط لهیدگی تاثیرگذار است. بنابراین، دستاورد این مطالعه می‌تواند کمک بزرگی به طراحان در استفاده از این نوع جاذب انرژی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی نماید.

**واژه‌های کلیدی:** لوله‌های مخروطی، شیار، حفره، شبیه‌سازی اجزاء محدود، جذب انرژی، نیروی بیشینه لهیدگی.

### Investigation of different geometric parameters effect on axial crushing of thin-walled conical tubes

S. Azarakhsh

Young Researchers and Elite Club, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

A. Ghamarian

Young Researchers and Elite Club, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

M. J. Rezvani

Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

### Abstract

Thin-walled structures have always been considered by designers as components with excellent energy absorption and high strength to weight. These structures are made in different shapes and geometries. Conical tubes are one of the types of thin-walled structures that deform the plastic and absorb energy under loading in different ways. The energy absorbed through plastic deformation depends on various factors such as the geometry of the tube, the volume, the angle of applied load and the materials. In this paper, a comprehensive study has been performed on thin-walled conical tubes as energy absorbers using numerical simulations. For this purpose, the effect of various parameters including the presence of the cap at the end of the tube, annular and longitudinal grooves, the creation of holes on the tube wall and loading angle has been investigated on the crushing mode and energy absorption. The results show that although the presence of annular, longitudinal grooves and creating holes on the tube wall leads to reduced energy absorption, but it causes a stable collapse and reduces the maximum crushing load and prevents the suddenly applied load to occupants and the main part of structures. Also, the results showed that the number of holes did not have a significant effect on the collapse and the behavior of the load-displacement curve; while the shape of the hole geometry affects the collapse mode and the mean crushing load. Therefore, the results of this study can be helpful to designers in the use of this type of energy absorption in various industries including the automotive industry.

**Keywords:** Conical tubes, Groove, Hole, FEM, Energy absorption, maximum crushing load.

مختارنژاد و همکاران نیز [۱] به بررسی اثر تغییر عمق و طول

شیارها در لوله‌های شیاردار پرداختند. آن‌ها در نتایج شبیه‌سازی به این نتیجه رسیدند که برای دست یافتن به فروریزش مناسب طول شیار یکی از معیارهای مهم در طراحی جاذب انرژی است.

علوی‌نیا و همکاران [۲] به بررسی جذب انرژی و نحوه لهیدگی سازه‌های جدارنازک مربعی تحت بار محوری و مورب شبه‌استاتیکی پرداختند. در این تحقیق همچنین اثر زوایای بارگذاری (۷، ۱۴ و ۲۷ درجه) بر میزان جذب انرژی نیز بررسی گردید.

### ۱- مقدمه

لوله‌های جدارنازک به‌عنوان اجزاء جاذب انرژی ضربه کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا، سازه‌های دریایی، صنایع خودروسازی و ... دارند. یکی از مسائل مهم جهت طراحی لوله‌های جدارنازک بررسی پدیده کمناش و انرژی جذب شده می‌باشد. در سال‌های اخیر تغییرشکل و جذب انرژی لوله‌های جدارنازک با هندسه‌های مختلف از جمله مربعی، استوانه‌ای، مخروطی و ... مورد بررسی‌های زیادی قرار گرفته است.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: Sajad\_Azarakhsh@Yahoo.com

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۰/۲۱

آذرخش و همکاران [۳] به بررسی رفتار مکانیکی لوله‌های استوانه‌ای دوجداره خالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری محوری پرداختند. در این تحقیق اثر پارامترهای هندسی از جمله ضخامت، زاویه نیم‌راس و همچنین سرعت و جرم برخورد کننده بر نسبت انرژی جذب شده دینامیکی به استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت.

حسینی تهرانی و پیرمحمد [۴] به بررسی رفتار فروریزش و میزان جذب انرژی سازه‌هایی با سطح مقطع مختلف (مربعی، شش ضلعی، هشت ضلعی و دایره‌ای) تحت بارگذاری محوری و مورب پرداختند و مشاهده کردند که مقطع هشت ضلعی دارای پتانسیل زیادی جهت جذب انرژی ضربه است.

الماراکبی و همکاران [۵] به بررسی رفتار فروریزش سازه‌های S شکل آلومینیومی و استیل با سطح مقطع‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که سازه شش ضلعی و هشت ضلعی بهترین جذب انرژی را دارند.

قانی و حسن [۶] رفتار فروریزش لوله‌های دارای آغازگر با سطح مقطع مربع را به روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. در این پژوهش اثر زاویه آغازگر بر میزان جذب انرژی، راندمان نیروی فروریزش و انرژی ویژه جذب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از آغازگر باعث کاهش ماکزیم نیروی فروریزش می‌شود.

علوی‌نیا و چهاردولی [۷] پارامترهای موثر بر فروپاشی چند لوله آلومینیوم تودرتو را با استفاده از آزمایش‌های تجربی و روش شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی نمودند. بعد از صحت‌گذاری شبیه‌سازی اجزاء محدود که با نرم افزار Ls-Dyna انجام شد مشاهدات نشان داد که چند لوله تودرتو قابلیت جذب انرژی بهتری در مقایسه با تک لوله با همان ضخامت، ارتفاع و جرم دارند.

رهی [۸] میزان انرژی جذب شده و نحوه لهیدگی لوله‌های دوجداره دایره‌ای-مربعی را تحت بارگذاری محوری به روش عددی و آزمایشگاهی بررسی نمود. در این پژوهش اثر پارامترهای مختلفی از جمله تقویت‌کننده چند سلولی، درپوش مسطح و ... بر میزان جذب انرژی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

شریعی و همکاران [۹] رفتار کمانش و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی را تحت بارگذاری محوری به روش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش اثر هندسه، ضخامت، ارتفاع، وجود شیار بر روی پوسته‌ها و فاصله شیارها از یکدیگر بر بار کمانش و مقدار جذب انرژی بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین مقدار انرژی جذب شده و بیشترین بار کمانش متعلق به لوله استوانه بدون شیار است.

حسینی و همکاران [۱۰] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی توخالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری محوری پرداختند. آن‌ها همچنین اثر ضخامت و تزریق فوم بر ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش ضخامت جاذب تاثیر بسیار زیادی بر انرژی جذب شده و نیروی قابل تحمل توسط جاذب دارد.

آذرخش و همکاران [۱۱] رفتار لهیدگی و پاسخ انرژی جذب شده لوله‌های استوانه‌ای برنجی را با استفاده از آزمایش و مدل اجزاء محدود بررسی کردند. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان داد که مدل

عددی روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و میزان انرژی جذب شده ارائه می‌کند. همچنین از روش شبیه‌سازی صحنه‌گذاری شده برای بررسی اثر پارامترهای مهم مانند عیوب هندسی، شرایط مرزی، زاویه نیم‌راس، تقویت‌کننده‌های چند سلولی و ... استفاده نمودند.

آذرخش و همکاران [۱۲] به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدارنازک مخروطی تک‌داره تحت بارگذاری محوری و مایل پرداختند. در این تحقیق اثر پارامترهای مختلف از جمله زاویه نیم‌راس، زاویه بارگذاری و وجود فوم درون لوله بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

بای و رهی [۱۳] به بررسی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک برش خورده تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و مایل پرداختند. نتایج نشان داد که ایجاد برش‌های متقارن بر لبه پوسته‌های استوانه‌ای باعث کاهش نیروی اولیه فروریزش گردیده که این نیرو با افزایش تعداد برش بر لبه جاذب، کاهش بیشتری پیدا می‌کند.

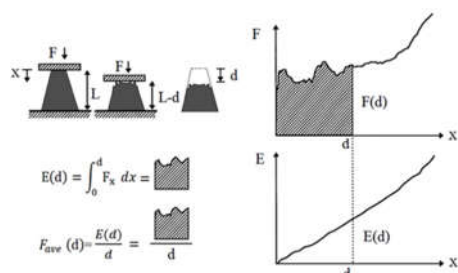
علوی‌نیا و رحمانی [۱۴] به بررسی تغییر شکل و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی استوانه‌ای پر شده با فوم تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و دینامیکی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که وجود فوم باعث افزایش میزان جذب انرژی در سازه‌ها گردیده که این افزایش در میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در چگالی‌های بالاتر فوم نمایان‌تر است.

جعفریان و رضوانی [۱۵] رفتار لهیدگی مخروط‌های جدارنازک چند جزئی را در دو حالت با انتهای باز و انتهای بسته مقایسه کردند آنها نشان دادند که استفاده از چنین ساختاری به‌عنوان جاذب انرژی در خودرو میتواند موجب کاهش خسارات وارد بر خودرو و سرنشینان شود. رضوانی و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از آغازگر پرداختند. وجود آغازگر در بالای لوله سبب گردید تا از اعمال نیروی ناگهانی به قسمت اصلی سازه جلوگیری شود.

هادیان و واحدی [۱۷] در جهت بهینه‌سازی یک جاذب مخروطی درپوش دار از جنس فولاد که بر روی دیواره‌های آن حفره وجود داشت بررسی‌هایی انجام دادند. حفره به‌عنوان پارامتری که باعث کمینه شدن نیروی بیشینه اولیه می‌شود مورد بررسی واقع گردید. در این پژوهش بر روی بدنه نمونه‌های مخروطی ۳، ۴ و ۵ حفره در ارتفاعات متفاوت از قاعده پایین مخروط به قطر ۸ میلی‌متری ایجاد کردند و به این نتیجه رسیدند که در بهینه‌ترین حالت، حداکثر نیروی اولیه ۵ کیلو نیوتون و انرژی ویژه ۴۰ ژول بر گرم است.

نیک‌خواه و همکاران [۱۸] عملکرد لوله‌های جدارنازک حفره‌دار (پنجره‌ای) تحت بارگذاری ضربه دینامیکی با استفاده از نرم افزار المان محدود LS-DYNA مورد مطالعه قرار دادند. همچنین با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره مشخص گردید که لوله دایروی با حفره مربعی بهترین عملکرد نسبت به سایر مقاطع دارد.

پیرمحمد و اسماعیلی مرزدشتی [۱۹] به بررسی تأثیر هندسه و ابعاد حفره بر عملکرد لهیدگی سازه‌های دوجداره مربعی و هشت ضلعی تحت بارگذاری محوری و مورب پرداختند. براساس نتایج، استفاده از حفره بر روی دیواره‌های سازه‌ها، بهبود قابل توجهی در کنترل میزان جذب انرژی نشان داد. همچنین همه ساختارهای



شکل ۱- معیارهای ارزیابی فروریزش محوری لوله‌های جدارنازک

### ۳- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از روش شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، لوله مخروط با درپوش مسطح با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه مطابق مرجع [۲۳]، مدل‌سازی می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۲-الف مشخص است نحوه لهیدگی متقارن محوری بوده که با نمونه تجربی مشابه است. از طرفی دیگر، خطای نمودار نیرو-جابجایی آن نیز مطابق شکل ۲-ب در حدود ۲ درصد است که قابل چشم‌پوشی است. همچنین مطابق مرجع [۲۴] لوله مخروط دو سرگیردار آلومینیومی که تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه قرار دارد، توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی می‌گردد. جهت مدل‌سازی لوله‌ها در نرم‌افزار ABAQUS، مشخصات ابعادی لوله‌های مخروطی درپوش‌دار و دوسرگیردار در جدول ۱ مطابق مراجع [۲۳ و ۲۴] آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات ابعادی لوله مخروطی درپوش‌دار و دوسرگیردار

[۲۳ و ۲۴]

نوع لوله مخروطی	قطر فوقانی (میلی‌متر)	قطر تحتانی (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)
درپوش‌دار	۳۱/۱۰	۶۵/۱۰	۹۷/۵۰	۱
دوسرگیردار	۵۰	۶۰	۵۵	۱

به طور کلی اختلاف در نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها در حالت تجربی و شبیه‌سازی (خصوصاً در لحظات اولیه برخورد) را می‌توان به صورت ذیل تشریح کرد.

وجود عیوب و نقص اولیه: نمونه‌های مخروطی ساخته شده در مرجع [۲۴] به روش چرخ‌کاری، دارای نقص اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و غیره) است. در این شبیه‌سازی نقص‌های اولیه به صورت دو درصد ضخامت در تغییر شکل مود کمانشی به نرم‌افزار المان محدود اعمال شده است.

عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود: در مرجع [۲۴]، سطح قاعده‌های نمونه‌های مخروطی توسط شیار قطعه‌ی فولادی گیردار شده است که این شرایط مرزی اجازه‌ی حرکت افقی بسیار اندکی را برای نمونه‌های مخروطی فراهم می‌نماید در حالی که این امر در نرم‌افزار المان محدود لحاظ نشده است.

حفره‌دار در مقایسه با ساختارهای بدون حفره نیروی اولیه لهیدگی کمتری را نشان دادند.

حسینی تهرانی و همکاران [۲۰] چندین لوله مخروط با تقویت کننده داخلی تحت بار محوری و مایل مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از تقویت کننده داخلی، قابلیت ضربه‌پذیری در برابر بارهای مورب بهبود یافت و حساسیت لوله‌ها نسبت به بارهای مورب و تغییر شکل خمشی کاهش یافت.

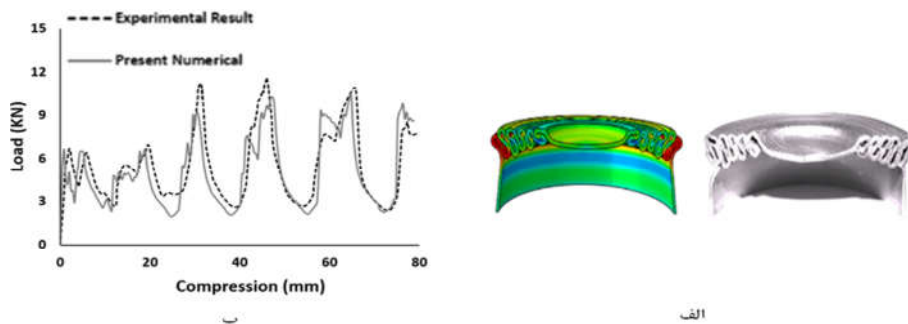
پیرمحمد و نیک‌خواه [۲۱] به بررسی فروریزش لوله های دوجداره با سطح مقطع‌های مختلف (مثلث، مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، ده ضلعی و دایره ای) پرداختند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود (LS-DYNA) در جهت یافتن شاخص‌های لهیدگی (جذب انرژی، بیشینه نیرو و ...) بر روی این لوله ها تحت بارهای محوری و مورب انجام شد

پیرمحمد و احمدی سراوانی [۲۲] به بررسی نحوه تغییر شکل و جذب انرژی سازه‌های مخروط پر شده از فوم تحت بارگذاری مورب و محوری پرداختند. نتایج تجربی به دست آمده به وسیله نرم‌افزار LSDYNA اعتبارسنجی گردید و معیارهای ضربه‌پذیری شامل جذب انرژی ویژه، بیشترین نیروی کمانش و نیروی متوسط لهیدگی بدست آمد. براساس نتایج حاصل از تحلیل عددی، سازه هایی که به صورت نیمه پر از فوم بودند، عملکرد بالاتری نسبت به لوله های کاملاً پر شده از فوم داشتند.

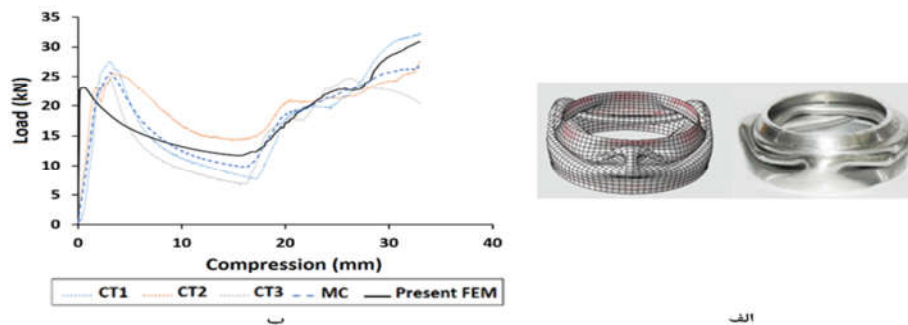
در مطالعه حاضر، برای بهبود عملکرد لوله‌های مخروط جدارنازک، پارامترهای هندسی شامل وجود درپوش در انتهای لوله، شیارهای حلقوی و طولی، ایجاد حفره در دیوار لوله با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS بررسی می‌شود. در ابتدا مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند لهیدگی لوله‌های مخروطی ارائه می‌شود و با نتایج تجربی محققین پیشین صحت‌گذاری می‌گردد. سپس از مدل صحت‌گذاری شده برای بررسی پارامترهای هندسی مؤثر بر رفتار فروریزشی استفاده می‌شود.

### ۲- جاذب‌های انرژی فروریزشی

به طور کلی مهم‌ترین شاخص‌های فروریزش جاذب‌های انرژی فروریزشی، میزان انرژی جذب‌شده و متوسط نیروی فروریزش است. شکل ۱ لوله جدارنازک به ارتفاع L را نشان می‌دهد که تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری به میزان d فشرده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر میزان انرژی جذب شده ( $E_d$ ) در طی این جابجایی است و متوسط نیروی فروریزش برابر نسبت میزان انرژی جذب شده به طول جابجایی است. ( $F_{ave}$ ) هدف کلی از این تحقیق، یافتن بهترین نمونه از نمونه‌های مورد بررسی قرار گرفته شده براساس جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی است.



شکل ۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر با نمونه تجربی مرجع [۲۳] الف- شکل لهیدگی و ب- نمودار نیرو-جابجایی



شکل ۳- اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر با نمونه تجربی مرجع [۲۴] الف- شکل لهیدگی و ب- نمودار نیرو-جابجایی

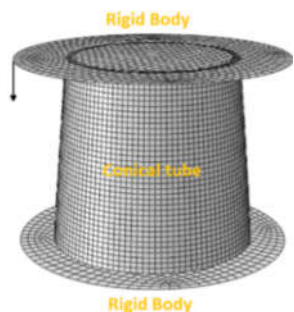
#### ۴- شبیه‌سازی عددی

##### ۴-۱- پارامترهای هندسی

در این مطالعه، پارامترهای هندسی مورد مطالعه شامل درپوش تخت (مسطح)، شیار عمودی، شیار محیطی، حفره و هندسه سطح مقطع است. جدول ۲ نیز ثوابت طراحی را برای لوله مخروطی نشان می‌دهد.

جدول ۲- ابعاد هندسی ثابت در طراحی

زاویه (درجه)	قطر فوقانی (میلی‌متر)	قطر تحتانی (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)
۵	۵۰	۶۰	۵۵	۲



شکل ۴- هندسه لوله مخروطی تحت بارگذاری محوری

در شبیه‌سازی لوله مخروط تحت بارگذاری محوری، رفتار غیرخطی مواد و اثر برخورد چین‌های لوله مخروط با خودش یا با صفحات صلب بالایی و پایینی، مدل‌سازی شده تا شرایط شبیه‌سازی با شرایط واقعی منطبق باشد. جنس نمونه‌ها از آلومینیوم آلیاژی ۱۰۵۰ است که رفتار الاستیک آن در نرم‌افزار المان محدود با مدول الاستیسیته ۷۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ تعریف می‌شود. رفتار ناحیه پلاستیک آن نیز با استفاده از مقادیر تنش حقیقی و کرنش پلاستیک معرفی می‌شود که مقادیر آن در مرجع [۲۴] مطابق جدول ۲ ارائه شده است.

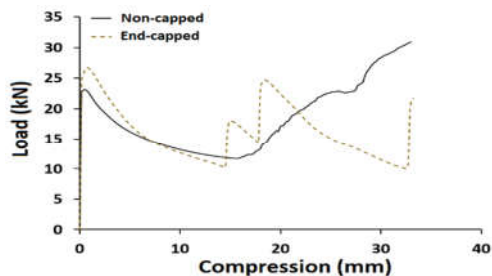
جدول ۲- نقاط نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک لوله مخروطی

آلومینیومی در نرم افزار المان محدود [۲۴]					
تنش حقیقی (مگاپاسکال)	۸۳	۹۰	۹۴	۹۸	۱۰۵
کرنش پلاستیک	۰	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱	۰/۱۷

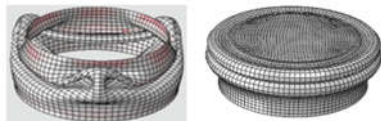
با توجه به کاربرد فراوان ضربه‌گیرها (لوله‌های جدارنازک) در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی و همچنین محدودیت فضا و وزن در بکارگیری آن‌ها، نیاز است که ابعاد ضربه‌گیرها (طول، قطر و ...) از یک محدوده خاصی تجاوز نکنند. در این مقاله معیار انتخاب ابعاد لوله براساس کار انجام شده توسط پاکزلی [۲۵] بوده که در آن رفتار لوله‌های جدارنازک با نسبت  $D/t > 20$  (D قطر متوسط و t ضخامت) مورد بررسی واقع گردید.

##### ۴-۲- مراحل شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی عددی مطابق شکل ۴ صفحات صلبی تعریف می‌شود که هر یک معرف فک متحرک و ثابت دستگاه تست کشش-فشار هستند. در مطالعه حاضر، لهیدگی لوله مخروطی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک بررسی می‌شود، بنابراین جرمی برای جسم صلب متحرک لحاظ نمی‌شود.



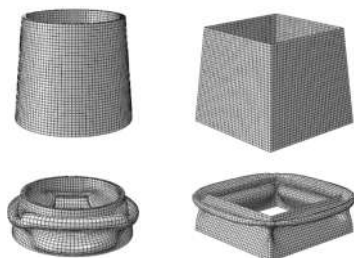
شکل ۶- اثر درپوش بر نمودار نیرو- جابه‌جایی لوله مخروطی تحت بارگذاری محوری



شکل ۷- مقایسه شیوه فروریزش لوله مخروطی دهانه بسته و باز تحت بارگذاری محوری

#### ۵-۲- اثر هندسه سطح مقطع

در این بخش، هندسه سطح مقطع لوله مخروط مربعی و دایروی در نظر گرفته شده است. به طوری که طول ضلع قاعده تحتانی و فوقانی به ترتیب برابر قطر تحتانی و فوقانی در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترهای هندسی لوله مخروطی با سطح مقطع مربعی (نظیر ضخامت، ارتفاع و زاویه) نیز مشابه لوله مخروطی با سطح مقطع دایروی انتخاب شده است. که در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۸ فروریزش نمونه را برای هر دو هندسه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نحوه تغییرشکل لوله مخروطی با سطح مقطع مربعی به صورت متقارن است که از لبه فوقانی شروع شده و به سمت پایین ادامه می‌یابد.



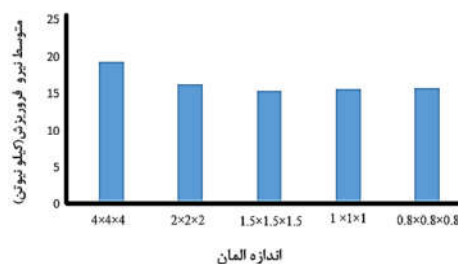
شکل ۸- اثر هندسه سطح مقطع بر فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی و انرژی ویژه لوله مخروطی با سطح مقطع متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی که بیانگر انرژی جذب شده است برای لوله مخروط با سطح مقطع مربع در حدود ۹ درصد کمتر از دایره است. بنابراین انتظار می‌رود، به دلیل افزایش وزن لوله مخروط با سطح مقطع مربع نسبت به دایره، جذب انرژی ویژه آن نیز مطابق شکل ۹-ب (در حدود ۳۱ درصد) کمتر از لوله مخروط با سطح مقطع دایره باشد. از طرفی دیگر، نیروی اولیه لوله مخروط با سطح مقطع مربع در

در شبیه‌سازی حاضر، شرط تماس لغزشی نیز در سطح تماس دیواره لوله مخروط با صفحه صلب بالایی (فوقانی) استفاده می‌شود. ضریب اصطکاک در شرط تماس لغزشی ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۲۴]. همچنین در این شبیه‌سازی شرط خود تماسی در سطوح لوله مخروط پیش‌بینی شده است تا از نفوذ گره‌های آن در حین چروک‌خوردگی جلوگیری شود.

در این شبیه‌سازی، برای لوله مخروط و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های مکعبی و المان صلب خطی استفاده شده است.

برای همگرایی مش و مستقل شدن نتایج نسبت به ابعاد مش لازم است به گونه‌ای ابعاد المان‌ها انتخاب شوند که هم مدت زمان حل بهینه باشد و هم تغییرات ابعاد بر نتایج تاثیر گذار نباشد. برای این منظور، ابعاد مختلف به روش کاهش سایز مورد بررسی قرار گرفت و مطابق شکل ۵، از مش‌بندی به ابعاد  $1/5 \times 1/5 \times 1/5$  میلی‌متر مکعب به بعد (در جهت کاهش ابعاد المان) تغییری در متوسط نیروی فروریزش ایجاد نگردیده است. بنابراین برای کاهش محاسبات حل، ابعاد  $1/5 \times 1/5 \times 1/5$  میلی‌متر مکعب به عنوان ابعاد مش مناسب، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۵- همگرایی نیروی متوسط فروریزش لوله مخروطی بر حسب اندازه المان

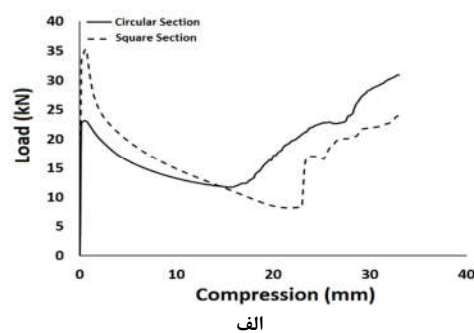
#### ۵- نتایج و بحث

##### ۵-۱- اثر درپوش تخت (مسطح)

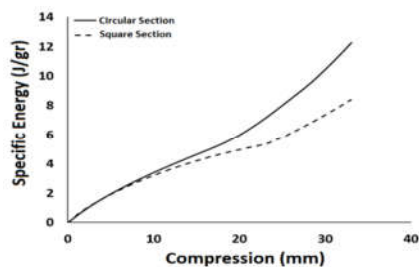
شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی لوله مخروط دارای درپوش و بدون درپوش را نشان می‌دهد. نتایج عددی بیانگر آن است که انرژی جذب شده و جذب انرژی ویژه لوله‌های مخروط بدون درپوش به ترتیب ۱۳ و ۳۴ درصد بیشتر از لوله مخروط درپوش دار است. اگر مقدار لهیدگی تا ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود (بازده لهیدگی ۳۵ درصد)، انرژی جذب شده لوله درپوش دار حدود ۱۴ درصد بیشتر از لوله مخروط بدون درپوش است. با این حال انرژی ویژه آن همچنان کمتر از لوله مخروط بدون درپوش (در حدود ۴ درصد) است.

از طرفی دیگر، وجود درپوش تخت مطابق شکل ۷ سبب تغییر شیوه فروریزش از الماسی سه‌گوش به متقارن محوری می‌شود. این امر نیز به دلیل آغاز فروریزش از درپوش مسطح است

حدود ۳۲ درصد بیشتر از سطح مقطع دایره است.



الف



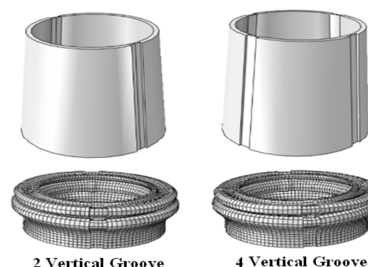
ب

شکل ۹- اثر سطح مقطع بر نمودار الف- نیرو-جابجایی و ب- انرژی ویژه- جابجایی لهیدگی محوری لوله مخروطی

### ۳-۵- اثر شیار عمودی

#### ۵-۳-۱- تعداد شیار

در این بخش ابعاد تمامی پارمترهای هندسی لوله مخروطی مطابق جدول ۱ است. شیارهای عمودی نیز مطابق شکل ۱۰ به عرض ۵ و عمق ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تعداد این شیارها در تحقیق حاضر، ۲ و ۴ شیار انتخاب شده است که زاویه موقعیت آنها نسبت به هم برابر است. آنچه به وضوح مشخص است، شیار عمودی سبب تغییر شکل متقارن محوری و یکنواختی لهیدگی لوله‌های مخروطی نسبت به لوله مخروطی بدون شیار می‌شود. این در حالی است که تعداد شیار عمودی اثر محسوسی بر شیوه فروریزش لوله‌های مخروطی شیاردار ندارد.

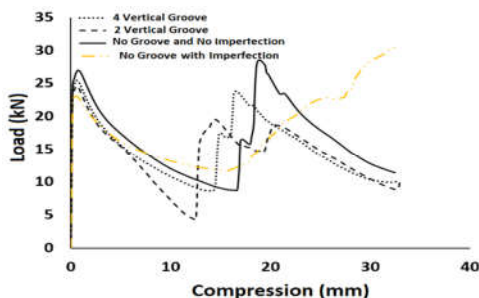


شکل ۱۰- اثر تعداد شیار عمودی بر فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

شکل ۱۱ مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بین لوله‌های مخروطی شیاردار عمودی با لوله مخروطی بدون شیار دارای عیوب هندسی و بدون

عیوب هندسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، انرژی جذب شده لوله‌های مخروطی با ۲ و ۴ شیار عمودی به ترتیب در حدود ۹ و ۱۳ درصد کمتر از انرژی جذب شده لوله مخروطی بدون شیار (بدون عیوب هندسی) است. همچنین انرژی جذب شده لوله‌های با ۲ و ۴ شیار عمودی به ترتیب در حدود ۱۹ و ۲۳ درصد کمتر از انرژی جذب شده لوله مخروطی بدون شیار (دارای عیوب هندسی) است.

از آنجا که تعداد شیارها تاثیر محسوسی بر جرم لوله‌ها ندارند لذا در مقدار انرژی ویژه جذب آن‌ها تغییر چندانی مشاهده نگردید. مقایسه بین لوله مخروطی بدون شیار و شیاردار عمودی نیز نشان داد که جذب انرژی ویژه لوله شیاردار در حدود ۱۰ درصد کمتر از لوله بدون شیار است. لازم به ذکر است که عیوب هندسی سبب تغییر شیوه فروریزش از متقارن محوری به تغییر شکل الماسی چند گوش می‌شود که این امر برخلاف تحقیق حاضر معمولاً با کاهش انرژی جذب شده همراه است. در مطالعه حاضر به دلیل طول کوتاه نمونه‌های مخروطی، انرژی جذب شده فروریزش متقارن محوری لوله‌های مخروطی کمتر از فروریزش الماسی شده است. از طرفی دیگر، شیار عمودی سبب کاهش اولین بیشینه نیروی فروریزش نسبت به لوله‌های مخروطی بدون شیار می‌شود. به طوری که مقدار این کاهش برای نمونه مخروطی با ۲ و ۴ شیار عمودی به ترتیب در حدود ۶ و ۹ درصد است.

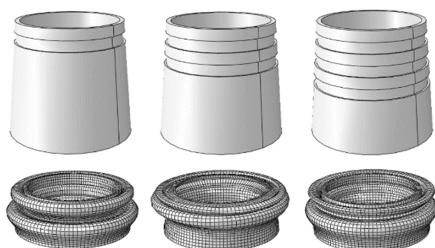


شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی لوله مخروطی با شیار عمودی و بدون آن (همراه و بدون عیوب هندسی)

### ۵-۳-۲- شیار داخلی و بیرونی

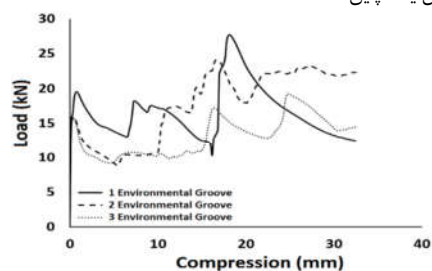
در این بخش اثر شیار داخلی و خارجی که عرض و عمق آن به ترتیب ۵ و ۱ میلی‌متر است، بر روی لوله مخروطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین صورت مطابق شکل ۱۲ دو شیار عمودی به طور مجزا بر روی سطح بیرونی و داخلی لوله مخروطی در نظر گرفته می‌شود. براساس آنچه مشاهده می‌شود، تغییر شیار بیرونی به داخلی اثر محسوسی بر شیوه فروریزش محوری لوله مخروطی ندارد. مطالعه دقیقی‌تر نمودار نیرو-جابجایی این لوله‌ها نیز مطابق شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مقدار نیروی اولیه و انرژی جذب شده لوله‌های مخروطی با شیار داخلی و بیرونی بسیار به یکدیگر نزدیک است. از آنجا که ایجاد شیار بیرونی نسبت به داخلی آسان‌تر است، بنابراین استفاده از شیار بیرونی منطقی‌تر به نظر می‌رسد.





شکل ۱۴- اثر تعداد شیار محیطی بر نحوه فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

با توجه به شکل ۱۵، در بیشینه نیروی لهیدگی، ماده تسلیم شده و با ایجاد اولین لولای پلاستیک نیرو به شدت کاهش می‌یابد. کاهش نیرو تا زمانی ادامه می‌یابد که یک چین به صورت کامل تشکیل شود. سپس لولای بعدی شکل گرفته و دوباره کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که هر یک از بیشینه نیروهای ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی با صرف نظر از ناپایداری منحنی معرف تشکیل یک چین است.

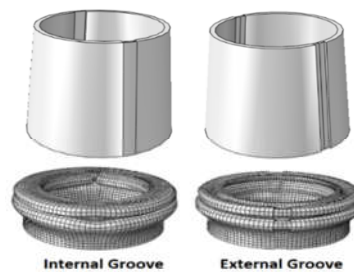


شکل ۱۵- اثر تعداد شیار محیطی بر نحوه فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

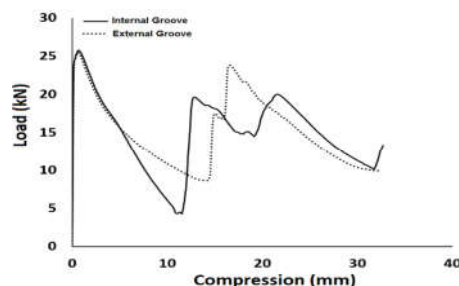
مقدار انرژی جذب شده لوله‌های مخروط با ۲، ۱ و ۳ شیار محیطی به ترتیب در حدود ۵۴۶، ۵۸۹ و ۴۳۵ ژول است که نسبت به انرژی جذب شده لوله مخروط بدون شیار در حدود ۱۰، ۳ و ۲۸ درصد افت انرژی دارد. همان طور که بیان شد کاهش اختلاف انرژی لوله مخروط با ۳ شیار محیطی نسبت به دیگر نمونه‌ها، شیوه فروریزش متفاوت آن است. با این حال، اگرچه با وجود شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته، ولی باعث ایجاد لولاهای پلاستیک یکنواخت در طول فرایند لهیدگی لوله می‌شود.

همچنین مقدار جذب انرژی ویژه لوله‌های مخروط با ۱ و ۳ شیار محیطی به ترتیب در حدود ۱۱/۶۰ و ۱۰/۲۱ ژول بر گرم است که نسبت به جذب انرژی ویژه لوله مخروط بدون شیار در حدود ۵ و ۷ درصد افت انرژی ویژه دارد. اما در حالت لوله با ۲ شیار محیطی، مقدار انرژی ویژه جذب در حدود ۱۳/۱۱ ژول بر گرم است که نسبت به انرژی ویژه جذب شده لوله مخروط بدون شیار (۱۲/۱۵ ژول بر گرم) در حدود ۸ درصد افزایش جذب انرژی ویژه دارد.

از طرفی دیگر، اولین نیروی بیشینه لوله‌های مخروط با ۱، ۲ و ۳ شیار محیطی نیز به ترتیب در حدود ۱۵، ۳۰ و ۳۲ درصد کمتر از اولین نیروی بیشینه لوله مخروط بدون شیار است. از آنجا که موقعیت شیار در لوله مخروط با ۱ شیار محیطی در محل تشکیل اولین چین در نظر گرفته شده است، بنابراین انتظار می‌رود، اولین نیروی بیشینه آن از کاهش قابل توجهی نسبت به لوله مخروط بدون شیار برخوردار نباشد.



شکل ۱۲- نمایی از هندسه و شیوه فروریزش لوله‌های مخروطی با شیار عمودی داخلی و بیرونی



شکل ۱۳- نمودار نیرو-جابجایی فروریزش محوری لوله‌های مخروطی با شیار عمودی داخلی و بیرونی

#### ۵-۴- اثر شیار محیطی

در این بخش به منظور مقایسه شیار عمودی و محیطی لوله مخروط، عرض و عمق شیارها به ترتیب ۵ و ۱ میلی‌متر و فاصله بین آنها ۵ میلی‌متر لحاظ شده است. همان طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، در لوله‌های مخروط با ۱ و ۲ شیار محیطی برخلاف لوله مخروط با ۳ شیار محیطی، بعد از تغییر شکل الاستیک اولیه، اولین لولای پلاستیک در شیار که نزدیک به ابتدای لوله مخروطی است، شکل می‌گیرد. سپس لولاهای پلاستیک در شیارهای داخلی به سمت خارج لوله حرکت می‌کنند و لولاهای پلاستیک مربوط به شیارهای خارجی به سمت داخل سوق داده می‌شوند. این امر سبب تشکیل چین‌ها به صورت متقارن محوری می‌شود.

همچنین مطابق شکل ۱۴، اولین چین در لوله مخروطی با ۳ شیار محیطی در ناحیه شیار دوم تشکیل می‌شود. با شروع تغییر شکل در این ناحیه، لوله مخروط تا برخورد چین خارجی به سطح صلب فوقانی دچار خمیدگی رو به داخل می‌شود. در ادامه، تغییر شکل در ناحیه چین سوم ایجاد می‌شود و مجدداً شیوه فروریزش به صورت خمیدگی رو به داخل تغییر می‌کند.

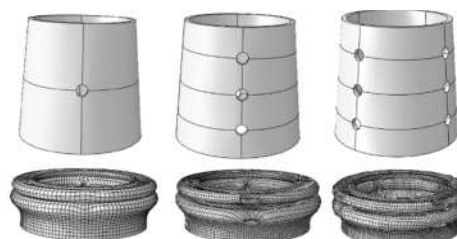
مقایسه نتایج لهیدگی لوله‌های مخروط با شیار عمودی و محیطی شامل انرژی جذب شده و اولین بیشینه نیروی فروریزش نشان می‌دهد که استفاده از شیار محیطی از اولویت بالاتری برخوردار است. چرا که در نمونه‌های با شیار محیطی، کاهش اولین بیشینه نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده به ترتیب بیشتر و کمتر از لوله مخروط بدون شیار است. مقایسه نتایج لوله شیاردار با لوله ساده نشان داد که افزودن شیار باعث کاهش نیروی بیشینه اولیه به میزان ۳۷ درصد و همچنین کاهش نیروی متوسط (انرژی جذب شده به طول لهیدگی) به میزان ۱۵ درصد شده است. بنابراین ساخت شیار ایده مناسبی در جهت کاهش حداکثر نیروی اولیه است.

### ۵-۵-۵- اثر حفره

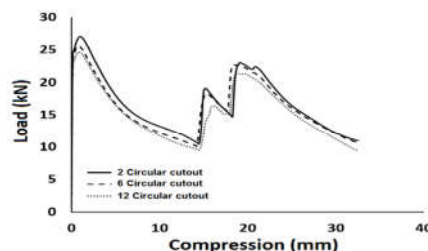
#### ۵-۵-۱- اثر تعداد حفره

در این بخش اثر حفره و تعداد آن بر رفتار فروریزش محوری لوله‌های مخروطی بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، حفره به صورت دایره با قطر ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که در لوله مخروطی اول در وسط نمونه در دو ستون (۲ حفره)، در لوله مخروطی دوم در دو ستون سه تایی (۶ حفره) و در لوله مخروطی سوم در چهار ستون سه تایی (۱۲ حفره) قرار گرفته است. فاصله هر یک از این حفره‌ها نیز نسبت به یکدیگر ۱۵ میلی‌متری لحاظ شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تعداد حفره‌ها اثر محسوسی بر شیوه فروریزش (شکل ۱۶) و رفتار نمودار نیرو-جابجایی (شکل ۱۷) ندارد.

از آنجا که لوله‌های مخروط از جمله سازه‌هایی هستند که تحت بارگذاری محوری دارای فروریزشی نامتقارن می‌باشند، لذا ایجاد تعداد محدودی حفره در طول لوله نه تنها منجر به کاهش نیروی بیشینه اولیه می‌گردد، بلکه باعث فروریزشی متقارن نیز می‌شود.



شکل ۱۶- اثر تعداد حفره دایروی بر نحوه فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

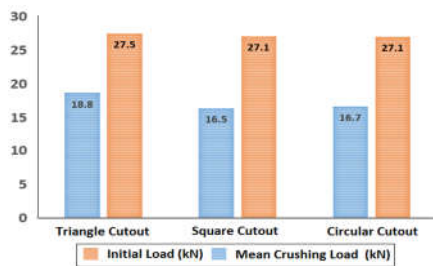
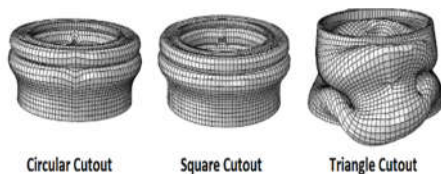


شکل ۱۷- اثر تعداد حفره دایروی بر نمودار نیرو-جابجایی فروریزش محوری لوله‌های مخروطی

همچنین قابل ذکر است که انرژی ویژه جذب لوله دارای حفره دایروی نسبت به لوله ساده (بدون حفره) در حدود ۸ درصد کمتر می‌باشد و نیروی بیشینه اولیه لوله‌های با حفره دایروی نسبت به لوله ساده چندان تفاوتی ندارد.

### ۵-۵-۲- اثر هندسه حفره

از آنجا که اثر محسوسی با افزودن تعداد حفره بر رفتار لوله مخروط مشاهده نشد، در این بخش از مطالعه، هندسه حفره شامل دایره به قطر ۵ میلی‌متر، مربع به ضلع ۵ میلی‌متر و مثلث متساوی‌اضلاع به ضلع ۵ میلی‌متر در وسط نمونه قرار گرفته است. اثر نوع هندسه حفره بر نحوه فروریزش و رفتار لهیدگی نمونه‌های مخروطی شامل اولین بیشینه نیرو و متوسط نیروی فروریزش در شکل ۱۸ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیوه فروریزش و متوسط نیروی فروریزش لوله مخروط با حفره مثلثی متفاوت از دیگر نمونه‌ها است. این امر به دلیل عدم تقارن حفره مثلثی لوله مخروط در جهت لهیدگی آن نسبت به هندسه مربعی و دایروی است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط نیروی فروریزش لوله مخروط با حفره مثلثی به ترتیب در حدود ۱۴ و ۱۲ درصد بیشتر از حفره مربعی و دایروی است. این در حالی است که مطابق شکل ۱۸-ب هندسه حفره اثر محسوسی بر نیروی اولیه فروریزش ندارد.



شکل ۱۸- اثر نوع هندسه حفره بر الف) نحوه فروریزش و ب) رفتار لهیدگی نمونه‌های مخروطی

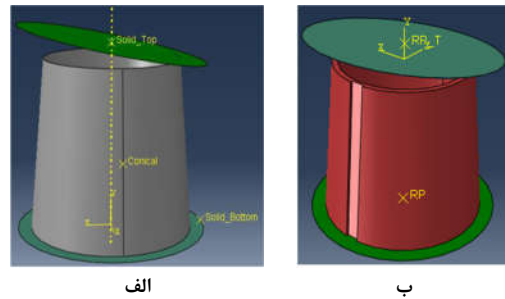
### ۵-۶- اثر زاویه بارگذاری

مطابق شکل ۱۹، لوله‌های مخروطی ساده (بدون درپوش) و شیاردار عمودی (با دو شیار) تحت زوایای بارگذاری مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه قرار می‌گیرند.



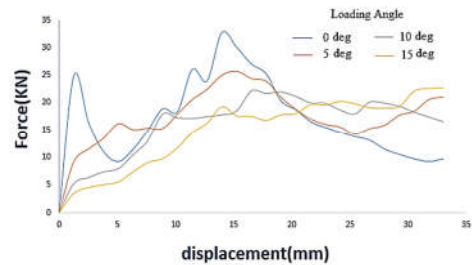
(مسطح)، تغییر سطح مقطع، ایجاد شیار عمودی و محیطی و ایجاد حفره پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که:

- انرژی جذب شده و انرژی ویژه لوله‌های مخروط بدون درپوش به ترتیب ۱۳ و ۳۴ درصد بیشتر از لوله‌های مخروط درپوش دار است. اما با بازده لهیدگی ۳۵ درصد (۲۰ میلی‌متر لهیدگی لوله)، انرژی جذب شده لوله درپوش دار در حدود ۱۴ درصد بیشتر از لوله مخروط بدون درپوش است. با این وجود نیز انرژی ویژه آن همچنان کمتر از لوله مخروط بدون درپوش (در حدود ۴ درصد) است.
- انرژی جذب شده و انرژی ویژه لوله مخروطی با سطح مقطع مربعی به ترتیب در حدود ۹ و ۳۱ درصد کمتر از دایروی است. بنابراین استفاده از لوله مخروط با سطح مقطع مربع نسبت به سطح مقطع دایره به منظور جذب شوک ضربه پیشنهاد نمی‌شود.
- انرژی جذب شده لوله‌های مخروط با ۲ و ۴ شیار عمودی به ترتیب در حدود ۹ و ۱۳ درصد نسبت به انرژی جذب شده لوله مخروط بدون شیار کمتر است. از طرفی دیگر، شیار عمودی سبب کاهش اولین بیشینه نیروی فروریزش نسبت به لوله‌های مخروطی بدون شیار می‌شود. به طوری که مقدار این کاهش برای نمونه مخروط با ۲ و ۴ شیار عمودی به ترتیب در حدود ۶ و ۹ درصد است.
- تغییر شیار بیرونی به داخلی اثر محسوسی بر شیوه فروریزش لوله مخروط و انرژی جذب شده و نیروی اولیه ندارد. لذا با توجه به اینکه ایجاد شیار بیرونی نسبت به داخلی آسان‌تر است، بنابراین استفاده از شیار بیرونی مناسب می‌باشد.
- مقدار انرژی جذب شده لوله‌های مخروط با ۱، ۲ و ۳ شیار محیطی به ترتیب در حدود ۵۴۶، ۵۸۹ و ۴۳۵ ژول است که نسبت به انرژی جذب شده لوله مخروط بدون شیار در حدود ۱۰، ۳ و ۲۸ درصد افت انرژی دارد. از طرفی دیگر، اولین نیروی بیشینه لوله‌های مخروط با ۱، ۲ و ۳ شیار محیطی نیز به ترتیب در حدود ۱۵، ۳۰ و ۳۲ درصد کمتر از اولین نیروی بیشینه لوله مخروط بدون شیار است.
- مقدار جذب انرژی ویژه لوله‌های مخروط با ۱ و ۳ شیار محیطی به ترتیب در حدود ۱۱/۶۰ و ۱۰/۲۱ ژول بر گرم است که نسبت به جذب انرژی ویژه لوله مخروط بدون شیار در حدود ۵ و ۷ درصد افت دارد. اما در حالت لوله با ۲ شیار محیطی، مقدار جذب انرژی ویژه در حدود ۱۳/۱۱ ژول بر گرم است که نسبت به جذب انرژی ویژه لوله مخروط بدون شیار (۱۲/۱۵ ژول بر گرم) در حدود ۸ درصد افزایش جذب انرژی ویژه دارد.
- تعداد حفره‌ها اثر محسوسی بر شیوه فروریزش و رفتار نمودار نیرو-جابجایی ندارند. این در حالی است که هندسه حفره مثلی بر شیوه فروریزش تأثیرگذار است. متوسط نیروی فروریزش لوله مخروط با حفره مثلی به ترتیب در حدود ۱۴ و ۱۲ درصد بیشتر از حفره مربعی و دایروی است.



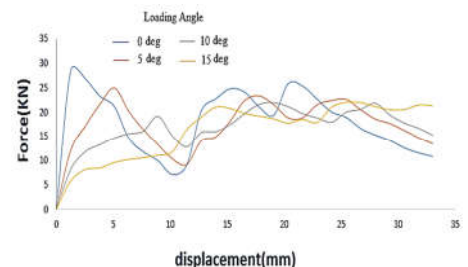
شکل ۱۹- لوله مخروطی الف) ساده و ب) شیاردار عمودی تحت بارگذاری مورب

مطابق شکل ۲۰، در بارگذاری مورب نیروی فروریزش نسبت به بارگذاری محوری (۰ درجه) به شدت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه بارگذاری بر روی لوله مخروطی ساده (بدون درپوش)، میزان انرژی جذب شده کم می‌شود به طوری که با تغییر زاویه بارگذاری از صفر تا ۱۵ درجه، حدود ۲۵ درصد انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰- نمودار نیرو-جابجایی لوله ساده تحت زوایای متفاوت بارگذاری

مطابق شکل ۲۱ در حالتی که لوله مخروطی شیاردار (با دو شیار عمودی) تحت بارگذاری مورب قرار می‌گیرد مشاهده می‌گردد که با افزایش زاویه بارگذاری، میزان جذب انرژی آن به مقدار کمتری (نسبت به لوله ساده) کاسته می‌شود به گونه‌ای که از حالت محوری تا زاویه بارگذاری ۱۵ درجه، انرژی جذب شده ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱- نمودار نیرو-جابجایی لوله شیاردار (با دو شیار عمودی) تحت زوایای متفاوت بارگذاری

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، پس از صحنه‌گذاری مدل با نتایج تجربی مطالعات پیشین به بررسی اثر پارامترهای هندسی شامل ایجاد درپوش تخت

- [12]. Azarakhsh S., Ghamarian A., Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads. *Thin-Walled Structures*, Vol. 112, pp.1-11, 2017.
- ۱۳]. بای م.، رهی ع.، بررسی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک برش خورده تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و مایل. *مجله مهندسی مکانیک*، شماره پیاپی ۹۰، جلد ۵۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۳۷-۴۶.
- ۱۴]. علوی‌نیا ع.، رحمانی ر.، بررسی تجربی و عددی رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی استوانه‌ای پر شده با فوم EVA تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای. *مجله مهندسی مکانیک*، شماره پیاپی ۸۷، جلد ۴۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۶۹-۱۷۸.
- [15]. Jafarian N. and Rezvani M.J., Crushing behavior of multi-component conical tubes as energy absorber: A comparative analysis between end-capped and non-capped conical tubes, *Engineering Structures*, Vol. 178, pp. 128-135, 2019.
- ۱۶]. رضوانی م ج.، نگهبان واشقانی ن.، دامغانی نوری م.، بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از آغازگر. *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، شماره ۴۴، سال چهاردهم، بهار ۱۳۹۵.
- [17]. Chahardoli, S., H. Hadian, and R. Vahedi, Optimization of hole height and wall thickness in perforated capped-end conical absorbers under axial quasi-static loading (using NSGA-III and MOEA/D algorithms). *Thin-Walled Structures*, 2018.
- [18]. Nikkhah, H., Baroutaji, A., Ghani Olabi, Abdul., "Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading", *Thin-Walled Structures*, Volume 142, Pages 132-148, September 2019.
- [19]. Pirmohammad, S., Esmacili-Marzdashti, S., "Multi-objective crashworthiness optimization of square and octagonal bitubal structures including different hole shapes, *Thin-Walled Structures*. Volume 139, Pages 126-138, June 2019.
- [20]. Hosseini-Tehrani, P., Pirmohammad, S., Golmohammadi. M., "Study on the collapse of tapered tubes subjected to oblique loads, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Volume: 222 issue: 11, pp. 2025-2039, 2008.
- [21]. Pirmohammad, S., Nikkhah H., "Crashworthiness investigation of bitubal columns reinforced with several inside ribs under axial and oblique impact loads", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 14 February 2017.
- [22]. Pirmohammad, S., Ahmadi Saravani. S., Crashworthiness Performance of Stiffened Foam-filled Tapered Structures under Axial and Oblique Dynamic Loads, *Latin American Journal of Solids and Structures*, January 26, 2018.
- [23]. Ghamarian, A., Zarei, H.R., Abadi, M.T., Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol.9, pp.1312-1319, 2011.
- [24]. Azarakhsh, S., Ghamarian, A., Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads, *Thin-Walled Structures*. 112, 1-11, 2017.
- [25]. Pugsley, Alfred., The large-scale crumpling of thin cylindrical columns. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* 13.1: 1-9. 1960.
- در بارگذاری مورب نیروی فروریزش نسبت به بارگذاری محوری (۰ درجه) به شدت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه بارگذاری بر روی لوله ساده مخروط (بدون درپوش)، میزان انرژی جذب شده کم می‌شود به طوری که با تغییر زاویه بارگذاری از صفر تا ۱۵ درجه، حدود ۲۵ درصد انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.
- در حالتی که لوله مخروطی شیاردار (با دو شیار عمودی) تحت بارگذاری مورب قرار می‌گیرد مشاهده می‌گردد که با افزایش زاویه بارگذاری، میزان جذب انرژی آن به مقدار کمتری (نسبت به لوله مخروطی ساده) کاسته می‌شود به گونه‌ای که از حالت محوری تا زاویه بارگذاری ۱۵ درجه، انرژی جذب شده ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.
- ### ۷- مراجع
- [1]. Mokhtamezhad, F., Salehghaffari, S., Tajdari, M., Improving the Crashworthiness Characteristics of Cylindrical Tubes Subjected to Axial Compression by Cutting Wide Grooves from Their Outer Surface, *International Journal of Mechanical Sciences*, 114, 6-18, 2009.
- [2]. AlaviNia, A., FallahNejad, Kh., Badnava, H., Farhoudi, H.R., Effects of buckling initiators on mechanical behavior of thin-walled square tubes subjected to oblique loading, *Thin-Walled Struct*, 59: 87-96, 2012.
- [3]. Azarakhsh, S., Rahi, A., Ghamarian, A., Motamedi, H., Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes, *Thin-Walled Structures*, 95, 60-72, 2015.
- [4]. Tehrani, H., Pirmohammad, S., Collapse study of thin-walled polygonal section columns subjected to oblique loads, *J Auto Eng* 1(1): 267279, 2011.
- [5]. Elmarakbi, A., Long, Y.X., MacIntyre, J., Crash analysis and energy absorption characteristics of S-shaped longitudinal members, *Thin-Walled Struct*, 68, pp. 65-74, 2013.
- [6]. Ghani, A., Hassan, M., Axial crush behaviour of square column with external tapered plunger, *Journal of engineering sciences*, vol. 41, pp. 1498-1517, 2013.
- [7]. Alavinia, A., Chahardoli, S., Mechanical behavior of nested multi-tubular structures under quasi-static axial load, *Thin-Walled Structures*, Vol. 106, p.p 376-389, 2016.
- [8]. Rahi, A., Controlling energy absorption capacity of combined bitubular tubes under axial loading, *Thin-Walled Structures*, 123, 222-231, 2018.
- ۹]. شریعتی م.، داورپناه م.، چاوشان ح. و الله بخش ح. ر.، تحلیل تجربی و عددی کماتش و کنترل میزان جذب انرژی پوسته‌های با هندسه‌های مختلف از جنس فولاد ضد زنگ SS304L تحت بار محوری. *مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴، ش. ۳، ص. ۶۰-۶۸، ۱۳۹۳.
- ۱۰]. حسینی و.، شریعتی م.، میرزابابایی س.م.، و مهدی زاده رخی م.، تحلیل تجربی و عددی جذب انرژی توسط لوله‌های آلومینیومی جدار ضخیم توخالی و پر شده با فوم با در نظر گرفتن مدل‌های آسیب متفاوت. *مجله مهندسی مکانیک*، شماره پیاپی ۹۷، جلد ۵۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صفحه ۹۵-۱۰۴.
- ۱۱]. آذرخش، سجاد و عباس رهی و علی قمریان، بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی، *مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* دوره ۶/ شماره ۲/ صفحه ۱۸۱-۱۹۶/ سال ۱۳۹۵.